النوى ، الكتلة والطاقة
Noyau ,masse et énergie

I ـ التكافؤ "كتلة ـ طاقة"

1 ـ علاقة إنشتاين

توصل العالم إنشتاين من خلال الميكانيك النسبوية الخاصة سنة 1905م إلى أن هناك تكافؤ بين الكتلة والطاقة .

تمتلك كل مجموعة كتلتها m ، في حالة سكون ، طاقة E تسمى طاقة الكتلة تعبيرها هو :

$$E = m.c^2$$

$c \simeq 3.10^8 m/s$ سرعة الضوء

m كتلة المجموعة نعبر عنها ب kg

E طاقة المجموعة نعبر عنها بالجول .

عندما تتغير كتلة المجموعة ب Δm خلال تحول ما ، يكون تغير الطاقة الكتلية لهذه المجموعة هو :

$$\Delta E = \Delta m.c^2$$

Δm<0 (تنقص كتلة مجموعة في سكون) ، طاقتها الكتلية تنقص كذلك ΔE<0 : **تحرر المجموعة في هذه الحالة طاقة تمنحها للوسط الخارجي . (Q>0)**

Δm>0 (تزداد كتلة مجموعة في سكون) ، طاقتها الكتلية تزداد كذلك ΔE>0 : **تكتسب المجموعة في هذه الحالة طاقة من الوسط الخارجي . (Q<0)**

2 ـ وحدة الكتلة والطاقة

أ ـ وحدة الكتلة الذرية

في الفيزياء النووية ، تكون كتل النوى والدقائق صغيرة جدا ، لذا يعبر عنها بوحدة ملائمة تسمى وحدة الكتلة الذرية ونرمز لها بu

1u يساوي $\frac{1}{12}$ من كتلة ذرة الكربون 12

نعلم أن كتلة مول واحد من ذرات الكربون 12 تساوي 12.10^{-3}kg ويحتوي 1 مول على $N=6,02.10^{23}$ ذرة أي أن :

$1u = \frac{1}{12}\frac{12.10^3}{6.03.10^{23}} = 1,66.10^{-27} kg$ وبالتالي **$1u=1,66.10^{-27}$kg**

مثال : كتلة البروتون

$$m_p = 1,6725.10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_p = \frac{1,6725.10^{-27}}{1,66.10^{-27}} = 1,0073\text{u}$$

ب ـ وحدة الطاقة : الإلكترون ـ فولط

في الفيزياء النووية الجول وحدة غير ملائمة للطاقة ، لذلك يفضل استعمال الإلكترون ـ فولط ومضاعفاته كالميغا إلكترون ـ فولط (MeV) .

$$1eV = 1,602177 \times 10^{-19} J$$

$$1MeV = 10^6 eV = 1,602177 \times 10^{--13} J$$

ج ـ الطاقة المكافئة لوحدة الكتلة الذرية u .

حسب علاقة انشتاين الطاقة التي تكافئ 1u هي :

$$E = 1,66054 \times \left(299792458\right)^2\right) = 1492,42 \times 10^{-13} J$$

$$E = \frac{1492,42 \times 10^{-13}}{1,602177 \times 10^{-13}} = 931 MeV$$

$$1u = 931,5 MeV / c^2$$

مثال : حساب طاقة الإلكترون : $E=mc^2$ بحيث أن $m_e=9,1.10^{-31}kg$

$E=9,1.10^{-31}.9.10^{16}J=81,9.10^{-15}J$ وبما أن $1eV=1,6.10^{-19}J$ فإن $E=0,512Mev$

نستنتج أن كتلة الإلكترون بوحدة الطاقة الكتلية : $m_e=0,512Mev/c^2$.

II ـ طاقة الربط Energie de liaison

2 ـ 1 النقص الكتلي .

تبين قياسات دقيقة أنجزت بواسطة معيار الكتلة أن كتلة النواة تكون دائما أقل من مجموع كتل الدقائق التي تكونها .

مثال : كتلة نواة الدوتريوم ${}^{2}_{1}H$: $m\left({}^{2}_{1}H\right) = 2,0109u$

الدقائق المكونة لنواة الدوتريوم Z=1 و N=1

مجموع كتل الدقائق : $m_p + m_n = 2,0199u$

وبالتالي

$$\Delta m = \left(m_p + m_n\right) - m\left({}^{2}_{1}H\right) = 0,0050u$$

نسمي Δm بالنقص الكتلي للنواة .

بصفة عامة : **نسمي النقص الكتلي لنواة Δm الفرق بين مجموع كتل النويات وكتلة النواة وهو مقدار دائما موجب .**

$$\Delta m = \left(Zm_p + Nm_n\right) - m\left({}^{A}_{Z}X\right)$$

2 ـ 2 طاقة الربط

النواة مكونة من بروتونات ذات شحنة موجبة وn نوترونات ذات شحنة منعدمة . يفسر تماسك النواة بوجود قوى نووية ذات شدة كبيرة تسمى بقوى التأثيرات البينية القوية .

لفصل نويات النواة يجب إعطاؤها طاقة ، تسمى بطاقة الربط E_ℓ .

وحسب علاقة التكافؤ بين الكتلة والطاقة لأنشتاين فإن النقص الكتلي لنواة يكافئ الطاقة اللازمة إعطاؤها لفصل نوياتها :

$$Zm_p + (A-Z)m_n = m({}^{A}_{Z}X) + E_\ell$$

$$E_\ell = \Delta m.c^2 = \left(Zm_p + (A-Z)m_n - m({}^{A}_{Z}X)\right).c^2$$

<u>2 ـ3 طاقة الربط بالنسبة لنوية</u>

$$\varepsilon = \frac{E\ell}{A}$$

وحدة ε هي Mev/nucléon

وهي تمثل طاقة الربط المتوسطة لنوية .

- للحكم على مدى استقرار نويدة يجب اعتبار طاقة الربط بالنسبة للنوية .
- تكون نويدة أكثر استقرارا كلما كانت طاقة الربط بالنسبة للنوية كبيرة .

<u>تمرين تطبيقي</u> :

نعتبر نويدة الراديوم ${}^{226}_{88}Ra$

أحسب طاقة الربط لنويدة الراديوم واستنتج طاقة الربط بالنسبة لكل نوية .

نعطي : $m(Ra) = 225,977u$ و $m_p = 1,00728u$ و $m_n = 1,00867u$ و $1u = 1,66.10^{-27}kg$ و

$c=3.10^8m/c^2$

الجواب : طاقة الربط اللازمة هي الطاقة اللازمة لفصل نويات موجودة في حالة سكون .

$$E_\ell = \Delta m.c^2 = \left[\left(Zm_p + Nm_n\right) - m\left({}^A_Z X\right)\right].c^2$$

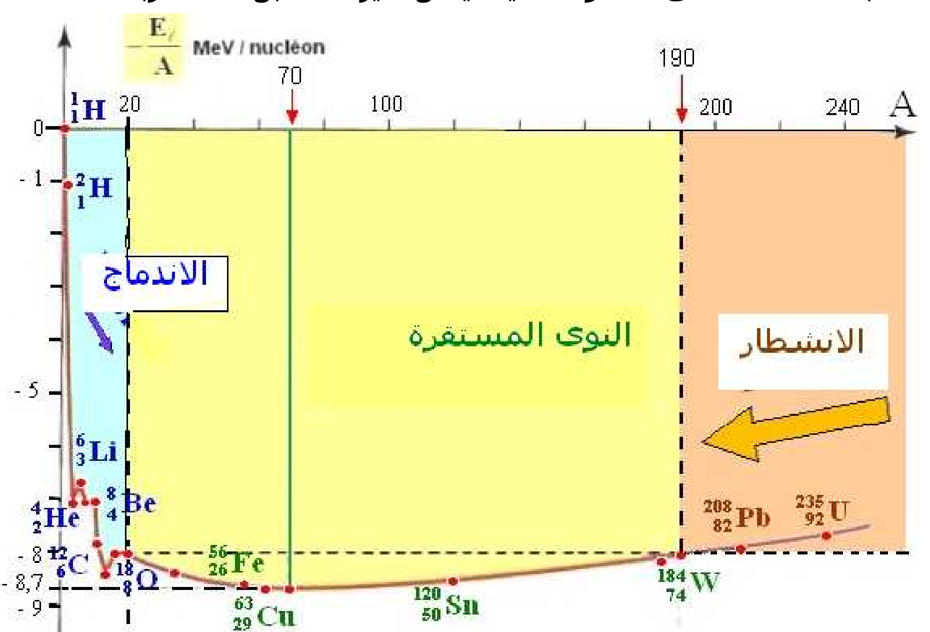
Z=88 و N=226 ومنه فإن

$$E_\ell = (88.1,00728 + 138.1,00867 - 225,977).9.10^{16} = 2,779.10^{-10}\,J = 1736,90MeV$$

طاقة الربط بالنسبة لكل نوية $\mathcal{E} = \frac{E\ell}{A}$ وبالتالي $\mathcal{E} = \frac{1736,90}{226} = 7,68MeV/c^2$

2 ـ 4 منحنى أسطون Aston

يمكن مقارنة استقرار مختلف النويدات باستعمال منحنى أسطون ، حيث يمثل تغيرات مقابل طاقة الربط بالنسبة لنويدة $\left(-\frac{E_\ell}{A}\right)$ بدلالة عدد النويات A . أنظر الشكل .



من خلال المنحنى نلاحظ :

- 20<A<195 :

$\left(-\frac{E_\ell}{A}\right)$ لها قيم دنيا تقارب قيمتها المطلقة $8MeV/c^2$. هذه المنطقة تظم النوى الأكثر استقرارا (مثال الحديد Fe هو النوى الأكثر استقرارا لذا يوجد بوفرة في الطبيعة .

- A<20 و A>195

$\left(-\frac{E_\ell}{A}\right)$ كبيرة أي أن $\left(\frac{E_\ell}{A}\right)$ صغيرة جدا وبالتالي فطاقة الربط بالنسبة لنوية ضعيفة الشيء الذي يبين أن هذه النوى غير مستقرة . يمكنها أن تتحول إلى نوى أكثر استقرارا .

يمكن لهذه أن تتحول وفق نوعين من التفاعلات النووية :

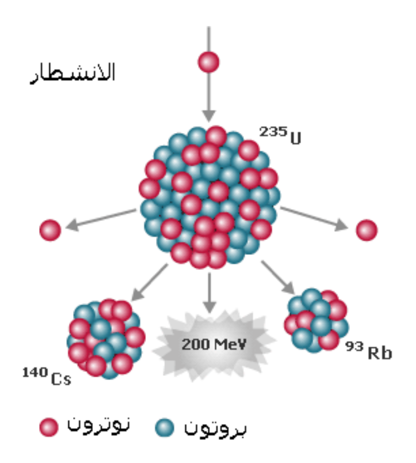
-- A>19 ـ النوى الثقيلة غير المستقرة تنشطر إلى نواتين خفيفتين . وتسمى هذه **الظاهرة الانشطار النووي .**

ـ A<20 ـ النوى الخفيفة تتحد فيما بينها لتعطي نواة أكثر ثقلا وتسمى هذه **الظاهرة الاندماج النووي .**

ملحوظة . الاندماج والانشطار تفاعلان محرّضان .

III ـ الانشطار والاندماج النوويان Fusion et fission nucléaire

1 ـ الانشطار النووي :



يمكن لنواة ثقيلة كالأورانيوم أو البلوتونيوم مثلا أن تنقسم ، بعد قدفها بنترون بطيء (طاقته الحركية أقل من 0,1MeV)إلى نواتين خفيفتين . يسمى هذا التحول الانشطار النووي ، وتسمى النوى الثقيلة النوى **الشطورة fissile** والنترون القديفة **: النوترون الحراري .**

أ ـ تعريف

الانشطار النووي تفاعل نووي تنقسم خلاله نواة ثقيلة شطورة ، بعد التقافها لنترون حراري إلى نواتين خفيفتين .

أمثلة :

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{140}_{55}Cs + ^{93}_{37}Rb + 3^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{94}_{38}Sr + ^{139}_{54}Xe + 3^{1}_{0}n + \gamma$$

ب ـ تفاعل متسلسل

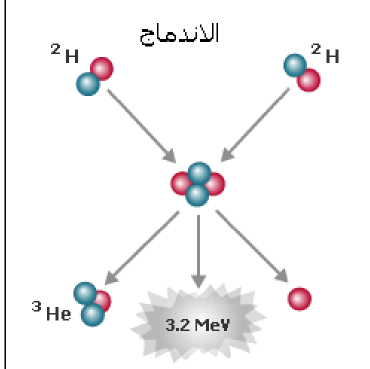
يمكن لنوترونات الناتجة عن الانشطار النووي أن :

ـ تفلت من وسط التفاعل .

ـ أو تلتقفها نوى غير شطورة .

أو تتسبب في انشطار نوى أخرى ، مساهمة في حدوث تفاعل متسلسل قد يتم بكيفية تفجيرية ، إذا كان غير متحكم فيه ، وهذا ما يحدث في القنبلة النووية . ويمكن التحكم فيه وضبطه وهذا ما يحدث في المفاعلات النووية حيث ينتج الطاقة بكيفية منتظمة .

ويتحكم في التفاعل التنسلسل في المفاعلات النووية عن طريف امتصاص النوترونات بواسطة قضبان من الكاديوم .





2 ـ الاندماج النووي .

أ ـ تعريف

الاندماج النووي تفاعل يتم خلاله انضمام نواتين خفيفتين لتكوين نواة أكثر ثقلا .

أمثلة : تقع تفاعلات الاندماج داخل الشمس حيث يتم خلالها تكون الهيليوم انطلاقا من الهيدروجين ، وفق ثلاث مراحل :

$$^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{2}_{1}H + ^{0}_{1}e$$

$$^{2}_{1}H + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He$$

$$^{3}_{2}He + ^{3}_{2}He \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H$$

ب ـ شروط تحقيق الاندماج النووي

لا يتحقق الاندماج النووي إلا إذا كان للنواتين الخفيفتين طاقة تمكنها من التغلب على قوى التأثيرات البينية التنافرية . ويتطلب توفير هذه الطاقة درجة حرارة عالية . ولهذا السب ينعت الاندماج **بالتفاعل النووي الحراري .**

VI ـ الحصيلة الكتلية والطاقية لتفاعل نووي .

1 ـ الحالة العامة :

نعتبر تفاعلا نوويا معبرا عنه بالمعادلة التالية :

$$^{A_1}_{Z_1}X_1 + ^{A_2}_{Z_2}X_2 \rightarrow ^{A_3}_{Z_3}X_3 + ^{A_4}_{Z_4}X_4$$

X_i تدل على نوى عناصر كيميائية أو دقائق .

الحصيلة الطاقية المقرونة بهذا لتفاعل هي :

$$\left[E_\ell(X_1) + E_\ell(X_2)\right] = \left[E_\ell(X_3) + E_\ell(X_4)\right] + \Delta E$$

$$\Delta E = \left[E_\ell(X_1) + E_\ell(X_2)\right] - \left[E_\ell(X_3) + E_\ell(X_4)\right]$$

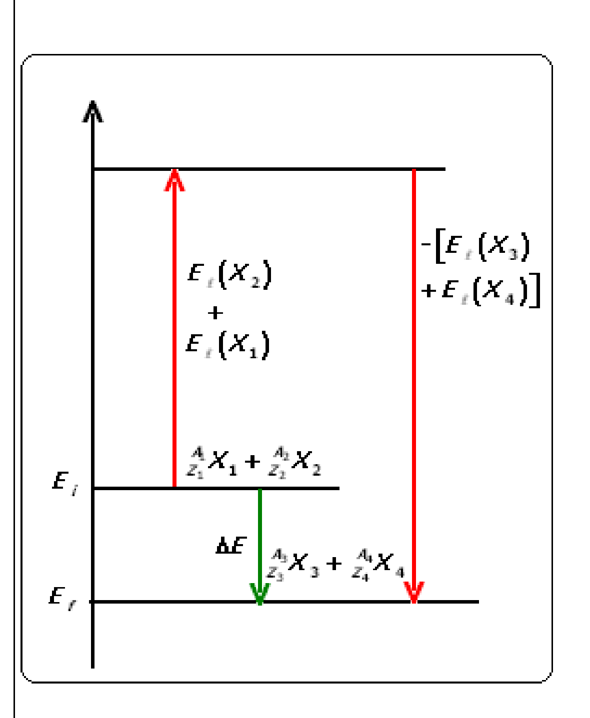
حيث $E_\ell(X_i)$ طاقة الربط للنواة أو الدقيقة X_i . و ΔE طاقة التفاعل .

حسب تعبير طاقة الربط E_ℓ لدينا :

$$\Delta E = \left[m(X_3) + m(X_4)\right].c^2 - \left[m(X_1) + m(X_2)\right].c^2$$

$$\Delta E = \left[m(X_3) + m(X_4) - m(X_1) - m(X_2)\right].c^2$$

$$\Delta E = \Delta m.c^2 = \left[m(produit) - m(reactifs)\right].c^2$$



ملحوظة : مخطط الطاقة لتفاعل نووي عام :

E_i : الطاقة البدئية للمجموعة

E_f : الطاقة النهائية للمجموعة .

$E_\ell(X_1)+E_\ell(X_2)$ الطاقة التي تكتسبها المجموعة لتفكيك النواتين .

$-\left[E_\ell(X_3)+E_\ell(X_4)\right]$ الطاقة التي تحررها المجموعة عند تكون النواتين X_3 و X_4 .

ΔE الطاقة الكلية لهذا التفاعل النووي وبذلك تصبح أكثر استقرارا .

ملحوظة : الطاقة المحررة خلال تفاعل ناشر للطاقة هي $Q=-\Delta E>0$

2 ـ تطبيقات على الانشطار ولاندماج النوويين

أ ـ الانشطار النووي :

نعتبر معادلة الانشطار النووي التالية :

$${}^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{140}_{55}Cs + {}^{93}_{37}Rb + 3\,{}^{1}_{0}n$$

نعطي كتل النوى المتدخلة في هذا التفاعل النووي .

${}^{235}_{92}U$	${}^{140}_{55}Cs$	${}^{93}_{37}Rb$	${}^{1}_{0}n$
234,99346 u	139,88711 u	92,90174 u	1,00866 u


أحسب الطاقة المحررة من طرف نواة واحدة من الأورانيوم .

لدينا حسب تعبير تغير الطاقة : $\Delta E=\Delta m.c^2$

بحيث أن

$$\Delta m = m_f - m_i$$

$$=\left[m\left({}^{140}_{55}Cs\right)+m\left({}^{93}_{37}Rb\right)+3m\left({}^{1}_{0}n\right)\right]-\left[m\left({}^{235}_{92}U\right)+m\left({}^{1}_{0}n\right)\right]$$

$$=\left[m\left({}^{140}_{55}Cs\right)+m\left({}^{93}_{37}Rb\right)+2m\left({}^{1}_{0}n\right)-m\left({}^{235}_{92}U\right)\right]$$

$$=-0{,}18729u=-3{,}1100\times10^{-28}kg$$

$$\Delta E=\Delta m.c^2=-2{,}7995\times10^{-11}J=-174{,}699MeV$$

أي أن انشطار نواة واحدة من الأورانيوم تحرر طاقة $Q=-\Delta E$ تساوي 174,699MeV .

مخطط الطاقة لتفاعل الانشطار : أنظر الشكل

ب ـ الاندماج النووي

نعتبر تفاعل الاندماج التالي :

$${}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{2}_{4}He + {}^{1}_{0}n$$

$$\Delta E=\Delta m.c^2$$

$$\Delta m = m_f - m_i=\left[m\left({}^{2}_{4}He\right)+m\left({}^{1}_{0}n\right)\right]-\left[m\left({}^{2}_{1}H\right)+m\left({}^{3}_{1}H\right)\right]$$

$$=-0{,}18729u=-3{,}1100\times10^{-28}kg$$

$$\Delta E=\Delta m.c^2\simeq-17{,}585MeV$$

${}^{2}_{1}H$	${}^{3}_{1}H$	${}^{2}_{4}He$	${}^{1}_{0}n$
2,01355	3,01550	4,00150	1,00866

تفاعل الاندماج يحرر طاقة تقارب 18MeV ، بينما تفاعل الانشطار يحرر طاقة تقارب 200MeV تقريبا . فالبنسبة لعدد النويات بالنسبة للاندماج النووي 5 نويات وبالنسبة للانشطار النووي 236 نوية أي أنه بالنسبة لنوية واحدة الطاقة المحررة بالاندماج أكبر بخمس مرات الطاقة المحررة بالانشطار .(أنظر سلسلة التمارين 2)

3 – تطبيقات على التحولات النووية التلقائية .

ملحوظة مهمة :

$\Delta E < 0$ تكون المجموعة ناشرة للطاقة أي أنها تحرر الطاقة يكتسبها المحيط الخارجي ($Q=-\Delta E>0$).

$\Delta E > 0$ تكون المجموعة ماصة للطاقة (تكتسب طاقة من المحيط الخارجي ($Q=\Delta E<0$))

بالنسبة للتفاعلات النووية التلقائية تكون دائما $\Delta E < 0$ ونرمز لها بالحرف E وتظهر هذه الطاقة على شكل طاقة طاقة حركية تكتسبها على الخصوص الدقائق المنبعثة خلال التفتت .

ا ـ النشاط الاشعاعي α

معادلة التفتت α هي :

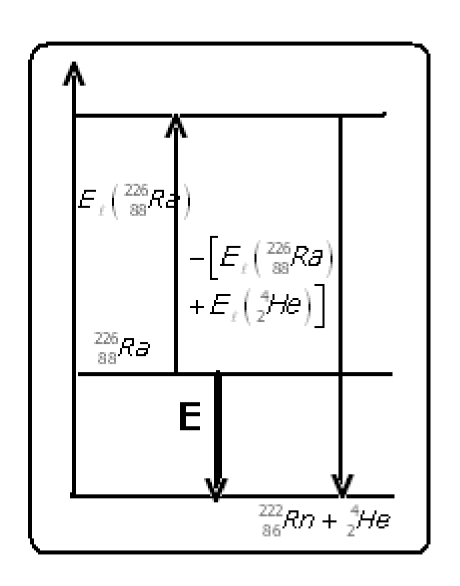
$${}^{Z}_{A}X \rightarrow {}^{A-4}_{z-2}Y + \alpha$$

الطاقة المتحررة خلال النشاط الإشعاعي α :

$$E = \left[m(\alpha) + m\left({}^{A-4}_{z-2}Y\right) - m\left({}^{Z}_{A}X\right) \right].c^2$$

تطبيق : أحسب الطاقة الناتجة عن تفتت نواة واحدة من الراديوم 226 . نواة الراديوم إشعاعية النشاط α نعطي :

${}^{226}_{88}Ra$	${}^{222}_{86}Rn$	${}^{4}_{2}He$
225,977u	221,9702	4,0015



$${}^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

ننجز الحصيلة الطاقية لهذا التفاعل :

$$E = \left[m\left({}^{222}_{86}Rn\right) + m\left({}^{4}_{2}He\right) - m\left({}^{226}_{88}Ra\right) \right].c^2$$

$$= \left[-5,3.10^{-3}u \right].c^2$$

نعلم أن $1u=931,5MeV/c^2$ وبالتالي فإن :

$$E = -5,3.10^{-3} \times 931,6 \frac{MeV}{c^2}.c^2 = -4,94MeV$$

وبالتالي الطاقة المحررة عن هذا التفاعل هي :

$Q = -E = E_C(\alpha) = 4,94MeV$ وهي تظهر على شكل طاقة حركية تكتسبها على الخصوص الدقيقة α .

ب ـ النشاط الإشعاعي β^- .

معادلة التفتت للنشاط الإشعاعي β^-

$${}^{Z}_{A}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e$$

الحصيلة الطاقية للنشاط الإشعاعي β^- :

$$E = \left[m\left({}^{A}_{Z+1}Y\right) + m\left({}^{0}_{-1}e\right) - m\left({}^{Z}_{A}X\right) \right].c^2$$

ج ـ النشاط الإشعاعي β^+

معادلة التفتت للنشاط الإشعاعي β^+

$${}^{Z}_{A}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e$$

الحصيلة الطاقية للنشاط الإشعاعي :

$$E = \left[m\left({}^{A}_{Z-1}Y\right) + m\left({}^{0}_{+1}e\right) - m\left({}^{Z}_{A}X\right) \right].c^2$$

ملحوظة :

تتحول الطاقة المحررة خلال التفاعلات النووية إلى طاقة حركية للنوى والدقائق الناتجة عن هذا التحول وكذلك إلى طاقة كهرمغناطيسية للإشعاعات γ .

$$Q = -\Delta E = \sum E_C\left({}^{A}_{Z}Y\right)$$

$^{A}_{Z}Y$: **النوى والدقائق الناتجة عن التحول**

٧ ـ التأثيرات البيولوجية للنشاط الإشعاعي .

للإشعاعات النووية تأثير على جسم الإنسان وذلك حسب الكمية التي يمتصها الجسم وبطبيعة الأشعة

- الإشعاعات α تخترق المادة بصعوبة ، إذ تكفي ورقة لإيقافها ، وتحدث حروقا سطحية على الجلد .
- الإشعاعات β أكثر نفاذية من α ، ويلزم عددة مليمترات لإيقافها . تستعمل هذه الإشعاعات لمعالجة الخلايا السرطانية .
- الإشعاعات γ نافدة بقدر كبير ، ولإيقافها يلزم عدة سنتيمترات من الرصاص ، وتستعمل في تشخيص الأمراض بالصور .

تستعمل الإشعاعات النووية في الطب بكميات ضئيلة جدا كعنصر لاستشفاء ولتشخيص الأمراض أو لمعالجتها .

كيف تؤثر الإشعاعات النووية على الإنسان ؟

تتفاعل الإشعاعات النووية ذات الطاقة العالية مع المادة المكونة لجسم الإنسان ، إذ يمكنها انتزاع إلكترونات ذرات خلايا بعض الأعضاء محدثة بعض التشوهات بيوكميائية .